

OPTIMIZACION DE COBERTURA EN REDES SFN MEDIANTE SA

M. Lanza, A.L. Gutiérrez, I. Barriuso, M. Domingo, J.R. Pérez, L. Valle, J. Basterrechea

marta.lanza@unican.es, jose.basterrechea@unican.es

Dpto. Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria.

Laboratorios I+D de Telecomunicaciones. Plaza de la Ciencia, Avda. Los Castros s/n. 39005 Santander.

Abstract- In the latest years, the need to improve the performance of traditional television systems, in terms of the number and quality of available services, has favored the migration from analog to terrestrial digital television systems, that can be implemented using Single Frequency Networks (SFN), more efficient from a spectrum point of view than the Multiple Frequency Networks (MFN). In this work, an approach is proposed to analyze and improve the performance of an initial SFN in terms of the coverage achieved over a specific geographical area in which the DVB-T services must be provided. Basically, the approach includes a propagation prediction tool, a receiver modeling and a Simulated Annealing (SA) optimization process used to fit several transmission parameters. Representative results obtained with two SFN are shown to demonstrate the usefulness of the approach proposed.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes de frecuencia única (SFN) están compuestas por un conjunto de transmisores que, operando a la misma frecuencia, emiten de forma sincronizada la misma información sobre una zona geográfica concreta y se emplean para prestar servicios como DVB-T o T-DAB. Además de su eficiencia espectral, las SFN presentan dos ventajas fundamentales frente a las redes multi-frecuencia (MFN): permiten asignar menores potencias de transmisión debido a su ganancia interna y proporcionar cobertura en regiones más extensas gracias a la reutilización de frecuencias.

Sin embargo, en este tipo de entornos multitrayecto es necesario un alto grado de sincronización a ambos lados de la comunicación para mantener la eficiencia espectral y facilitar la recuperación de la información transmitida. En función de los retardos de propagación existentes entre los transmisores y un punto receptor, las señales recibidas pueden contribuir total o parcialmente a la componente interferente y, si su nivel es elevado con respecto a la componente útil, causar desvanecimientos de señal importantes y zonas de sombra.

Con objeto de mitigar este efecto, las SFN orientadas a servicios DVB-T emplean la modulación OFDM que, sacrificando en cierto grado la máxima tasa binaria permitida en el sistema, garantiza la ortogonalidad y cancela parte de la interferencia a través de la inserción en el símbolo OFDM del prefijo cíclico durante el intervalo de guarda [1]. Para minimizar la interferencia en un punto se pueden aplicar otras técnicas como retrasar el envío de información desde los transmisores o aplicar una estrategia de sincronización apropiada para posicionar la ventana FFT en el receptor antes de combinar las señales de cada transmisor [2].

En este trabajo, se propone un método para simular el comportamiento de una red SFN de forma previa a su

despliegue o con el objetivo de mejorar el rendimiento en términos de cobertura de una red ya existente. En base a la configuración inicial de una red SFN (definida en términos de su frecuencia y modo de operación, número de transmisores y sus localizaciones y potencias asociadas) [3], se propone optimizar con el algoritmo del Recocido Simulado (SA) [4] varios parámetros de transmisión para mejorar la cobertura final sobre un área geográfica concreta. Los parámetros considerados son la ganancia y/o orientación de las antenas omnidireccionales o sectoriales y los retardos estáticos a aplicar a cada uno de los N transmisores de la red.

El método propuesto y los fundamentos teóricos del algoritmo SA se describen en las secciones II y III, respectivamente. En la sección IV se incluyen resultados representativos obtenidos en dos SFN y, por último, las conclusiones del trabajo se resumen en la sección V.

II. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Durante la etapa de planificación de una SFN orientada a servicios de DVB-T, parámetros como la frecuencia de operación de la red o el número de transmisores y su potencia deben ser fijados inicialmente [3]. Para mitigar el efecto que sobre los receptores provocan las múltiples réplicas de la señal transmitida y recibidas con diferentes retardos, se puede optimizar el retardo estático con el que debe enviarse la información desde cada transmisor para minimizar la interferencia. También puede resultar interesante reducir los costes de implementación de la SFN inicial, actuando sobre la potencia de los transmisores sin sacrificar la cobertura sobre el área bajo análisis. Ambas tareas resultan complejas desde un punto de vista práctico. En este trabajo se propone un método que modela y optimiza el comportamiento de una red SFN, tratando de mejorar su rendimiento en términos de cobertura. El método propuesto se divide en los tres bloques interconectados que se muestran en la Fig. 1 y descritos a continuación.

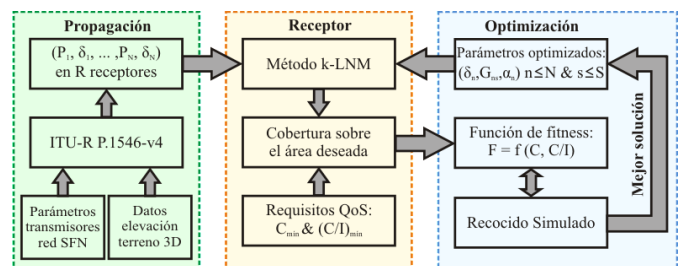


Fig. 1. Diagrama de bloques del método propuesto.

A. Modelo de predicción de la propagación

La herramienta de predicción de la propagación se usa para estimar la contribución de cada uno de los N transmisores que componen la red SFN en cada punto receptor del área a analizar, modelado mediante un mallado de celdas cuadradas de 92.5 m de lado [5]. Esta herramienta calcula la potencia de la señal (P_n) y el retardo asociado (δ_n) a cada transmisor ($1 \leq n \leq N$) en cada punto receptor ($1 \leq r \leq R$), en base a la norma ITU-R P.1546-v4 [6] y a la información digital del terreno obtenida mediante una interfaz GIS (Geographical Information System).

B. Modelo del receptor

El bloque receptor combina mediante el método k-LNM, con $k=0.7$, las señales que llegan a cada punto del mallado desde los N transmisores [3], que pueden contribuir total o parcialmente a las componentes útil e interferente. La máscara definida en (1) se utiliza para ponderar la contribución constructiva o destructiva de cada eco, en función de la longitud del símbolo útil (T_u), el intervalo de guarda (T_g) y el intervalo temporal durante el cual las señales contribuyen constructivamente ($T_p=7T_u/24$) [2].

$$\omega_n = \begin{cases} \left((T_u - t)/T_u \right)^2 & \text{si } (T_g - T_p) < t \leq 0 \\ 1 & \text{si } 0 < t \leq T_g \\ \left((T_u + T_g - t)/T_u \right)^2 & \text{si } T_g < t \leq T_p \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1)$$

Por otra parte, la estrategia de sincronización aplicada para posicionar la ventana FFT en el receptor también influye drásticamente en la contribución positiva o negativa de las señales a las componentes útil e interferente. Si bien la estrategia de sincronización del receptor varía según el fabricante, en este trabajo se han considerado seis variantes: centro de gravedad (CG), máxima señal (MS), primera señal situada X dB por debajo de la señal más fuerte (U1), primera señal por encima de un umbral (U2), cuasi-óptima (CO) y máxima C/I (MAX) [2].

Una vez combinadas las señales, la relación portadora a interferencia (C/I) se puede calcular en base a la máscara descrita en (1) [7], considerando una SFN compuesta por N transmisores $A=\{1, \dots, N\}$ y otros M transmisores de otras SFN operando a la misma frecuencia $B=\{1, \dots, M\}$, como:

$$\left(\frac{C}{I} \right) = \frac{\sum_{n \in A} P_n \cdot \omega_n (\delta_n - \delta_0)}{\sum_{n \in A} P_n \cdot (1 - \omega_n (\delta_n - \delta_0)) + \sum_{n \in B} P_n + N_0} \quad (2)$$

en donde P_n es la potencia recibida desde el transmisor n -ésimo, ω_n el valor de la máscara según (1), δ_n el retardo relativo del eco n -ésimo con respecto a la referencia temporal de sincronización δ_0 y N_0 la potencia de ruido de fondo, que en este caso se fija a -95 dBm.

Por último, este bloque evalúa si un punto receptor está o no cubierto en función de si satisface o no ciertos requisitos de calidad de servicio (QoS), especificados en términos de la señal útil (C) y la relación portadora a interferencia (C/I).

C. Proceso de optimización

Durante el proceso de optimización, el algoritmo SA trata de maximizar la cobertura dentro de un área geográfica concreta buscando la configuración óptima para varios parámetros de transmisión de la SFN seleccionados por el usuario (D incógnitas). La única relación existente entre el método de optimización y el problema bajo análisis se define en términos de una función de fitness que evalúa iterativamente la calidad de la solución aportada por el algoritmo en (3). En este caso, la función a minimizar en (4) evalúa el porcentaje de localizaciones sin cobertura, considerando que un punto está cubierto si C y (C/I) exceden dos valores umbrales impuestos por el diseñador (5), que para las SFN analizadas en la sección IV se fijan a $C_{\min}=-70$ dBm y $(C/I)_{\min}=18.9$ dB [1], respectivamente.

$$Q=(q_1, q_2, \dots, q_d, \dots, q_{D-1}, q_D) \quad (3)$$

$$F(\%)=100 \cdot \left(1 - \left(\sum_{r=1}^R \frac{\text{Cov}_r}{R} \right) \right) \quad (4)$$

$$\text{Cov}_r = \begin{cases} 1 & \text{si } C \geq C_{\min} \text{ \& } (C/I) \geq (C/I)_{\min} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5)$$

En este trabajo se han considerado dos situaciones. En primer lugar, considerando antenas omnidireccionales en transmisión y antenas directivas en recepción, con un ancho de haz de 60°, 13 dBi de ganancia y -12 dB de relación lóbulo principal a secundario, se optimizan los retardos estáticos a aplicar a los N transmisores así como las ganancias de las antenas omnidireccionales (OPT1). En segundo lugar, considerando antenas sectoriales en transmisión de 90° ($S=4$ sectores) y antenas directivas en recepción con un ancho de haz de 60° y 20° en acimut y elevación, respectivamente, una ganancia de 13 dBi y -12 dB de relación lóbulo principal a secundario, se optimizan el retardo estático a aplicar, la ganancia de las antenas sectoriales y sus orientaciones relativas en acimut para cada transmisor dentro de la SFN (OPT2).

III. RECOCIDO SIMULADO

El SA es un algoritmo probabilístico basado en una única solución, que trata de simular computacionalmente el proceso físico de recocido de un metal [4]. En general, el proceso comienza con una elevada temperatura, T_{a0} , para la cual la energía del sistema es máxima y los átomos que componen el material se distribuyen aleatoriamente por la estructura y presentan una elevada movilidad. Esta temperatura se disminuye gradualmente de acuerdo a un coeficiente de reducción, RT , de forma que los átomos de la estructura se posicionan cuidadosamente durante cada etapa del proceso de enfriamiento tratando de alcanzar el equilibrio térmico.

En cada iteración del algoritmo, $i \rightarrow i+1$, considerando una temperatura concreta, T_a , se modifica una dimensión del vector solución Q_i en (3) y se calcula la variación de energía en el sistema, ΔF (variación del fitness). A continuación, en base al criterio de Metropolis para problemas de minimización, si la energía del sistema decrece ($\Delta F < 0$) la solución Q_i es automáticamente aceptada y, en caso contrario

($\Delta F \geq 0$), se utiliza la Distribución de Probabilidad de Boltzman (DPB) en (6) para decidir si la nueva solución Q_{i+1} debe ser rechazada o no. De este modo, el SA proporciona un mecanismo de protección frente a óptimos locales durante las iteraciones iniciales del proceso, permitiendo al algoritmo evolucionar hacia soluciones de peor calidad. La posibilidad de aceptar dichas soluciones decrece a medida que la temperatura en el sistema disminuye y, por tanto, la solución se aproxima más a la óptima.

$$DPB(Q_i \rightarrow Q_{i+1}) = \begin{cases} e^{-(\Delta F/T_a)} & \text{si } \Delta F \geq 0 \\ 1 & \text{si } \Delta F < 0 \end{cases} \quad (6)$$

El proceso anterior se repite durante NS ciclos a cada temperatura T_a , tratando de alcanzar el equilibrio térmico en el sistema, utilizando como solución de partida Q_i o Q_{i+1} , en función del resultado obtenido en (6). Por último, para ajustar la variabilidad que puede tomar cada parámetro, esta búsqueda del estado de mínima energía se repite durante NT ciclos antes de disminuir la temperatura de acuerdo a RT.

IV. RESULTADOS

En este apartado se analiza el rendimiento del algoritmo SA cuando se aplica a la optimización de algunos parámetros de transmisión en una red SFN. En primer lugar, se considera como problema canónico para validar el método propuesto con tiempos de CPU razonables una red compuesta por $N=6$ transmisores con una potencia de $P_{Tx}=250$ W. La SFN debe proporcionar cobertura a un área geográfica muy montañosa situada en la zona central de Cantabria (delimitada por la línea amarilla de la Fig. 2), modelada mediante un total de $R=144950$ puntos receptores. Además, se asume un sistema DVB-T 2K $\frac{1}{4}$ ($T_u=224$ μ s y $T_g=56$ μ s). Por último, para tener en cuenta la contribución constructiva o destructiva a las componentes útil e interferente de las señales que llegan al receptor, se han considerado varias estrategias de sincronización para posicionar la ventana FFT: CG, MS, U1 (umbral situado en 6 dB por debajo de la señal más fuerte), U2 (umbral situado en -65 dBm), CO y MAX.

Para la SFN propuesta y considerando el caso OPT1, el algoritmo SA debe optimizar el retardo estático ($0 \leq \delta_n \leq 56$ μ s) a aplicar en cada transmisor de la red y la ganancia de las antenas omnidireccionales ($-20 \leq G_n \leq 0$ dB), tratando de mejorar la cobertura dentro del área bajo análisis. Por tanto, las incógnitas del problema se pueden resumir en un vector con $D=2 \times N=12$ dimensiones, tal que $Q=(\delta_1, G_1, \dots, \delta_N, G_N)$.

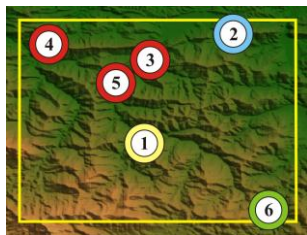


Fig. 2. SFN optimizada (OPT1+CG). Las antenas omnidireccionales en azul, verde, amarillo y rojo representan las ganancias a aplicar en los rangos [-20, -19.5], [-3, -2.5], [-1.5, -1] y [-0.5, 0] dB, respectivamente.

El SA se ha configurado con los siguientes parámetros: temperatura inicial $T_{a0}=0.5$, coeficiente de reducción de temperatura $RT=0.1$, y número de ciclos para alcanzar el

equilibrio térmico y ajustar la variabilidad $NS=20$ y $NT=5$, respectivamente. El número máximo de evaluaciones del fitness permitido es 5000.

Los resultados de cobertura obtenidos antes y después del proceso de optimización se resumen en la Tabla 1, promediando 25 realizaciones independientes. En primer lugar, los resultados demuestran que la solución proporcionada por el SA siempre mejora la cobertura de la SFN inicial. Esta mejora depende en gran medida de la estrategia de sincronización empleada para posicionar la ventana FFT en el receptor, porcentualmente variando desde el 2.9% (MAX) hasta el 14.4% (U2), y cuanto más sofisticada sea la estrategia menor es la diferencia entre la cobertura inicial y optimizada (MAX).

Considerando la estrategia de sincronización CG, la solución proporcionada por el algoritmo SA se resume en la Tabla 2, en la cual los retardos estáticos se referencian al transmisor con menor retardo (Tx4). De acuerdo a la solución, el transmisor 2 podría eliminarse de la red sin afectar negativamente a la cobertura final, lo cual implica un elevado ahorro en los costes de la SFN, debido a que es un transmisor de baja potencia y la optimización sugiere una ganancia cercana a -20 dB. Detalles de las ganancias omnidireccionales y los mapas de cobertura obtenidos antes y después de la optimización se muestran en las Figs. 2 y 3, respectivamente.

Criterio		Cobertura (%)					
		CG	MS	U1	U2	CO	MAX
Inicial	$C \geq C_{\min}$	94.5	94.5	93.5	94.5	94.5	94.5
	$(C/I) \geq (C/I)_{\min}$	85.8	84.0	83.4	73.8	85.1	93.9
	Ambos	82.7	81.5	80.8	71.4	82.6	90.4
SA	$C \geq C_{\min}$	93.2	94.0	92.8	92.5	94.0	94.4
	$(C/I) \geq (C/I)_{\min}$	94.0	87.7	88.8	86.4	89.3	96.7
	Ambos	89.8	84.3	85.3	81.7	85.8	93.0

Tabla 1. Resultados de cobertura obtenidos (OPT1).

Parámetro	Tx1	Tx2	Tx3	Tx4	Tx5	Tx6
δ (μ s)	29.31	54.74	40.89	0.00	35.13	32.84
G (dB)	-1.00	-19.99	-0.11	0.00	-0.06	-2.78

Tabla 2. Parámetros optimizados (OPT1+CG).

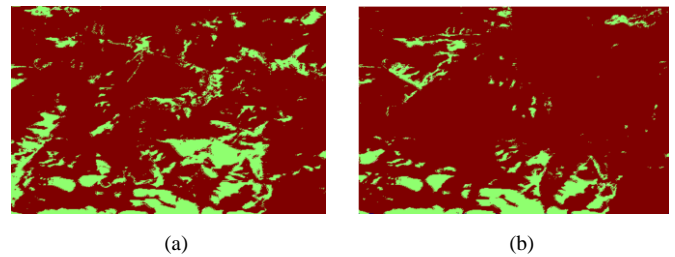


Fig. 3. Mapas de cobertura (OPT1+CG). (a) Inicial. (b) Optimizado. Los puntos receptores cubiertos y no cubiertos se representan en rojo y verde, respectivamente.

A continuación, con objeto de demostrar la utilidad del método propuesto, se propone analizar una SFN más realista, como la mostrada en la Fig. 4, que debe proporcionar cobertura a la región de Cantabria, modelada mediante $R=1842120$ puntos receptores. La red se compone de $N=25$ transmisores, cuya potencia, P_{Tx} , se resume en la Tabla 3. En base a las especificaciones empleadas en España para la implementación de SFN orientadas a servicios de televisión

digital terrestre, se supone un modo de funcionamiento 8K $\frac{1}{4}$ y la estrategia de sincronización U1, fijando un umbral de 17 dB por debajo de la señal más fuerte, típicamente empleado por los fabricantes en el diseño de receptores reales.

Considerando el caso anteriormente descrito como OPT2, el SA debe optimizar para cada transmisor de la SFN el retardo estático ($0 \leq \delta_n \leq 224 \mu s$), la ganancia de cada sector ($-20 \leq G_{ns} \leq 0$ dB, $1 \leq s \leq S$) y su orientación relativa en acimut ($-45 < \alpha_n \leq 45$ grados). Por tanto, el vector a optimizar en (3) contiene $D=6 \times N=150$ variables, $Q=(\delta_1, G_{11}, G_{12}, G_{13}, G_{14}, \alpha_1, \dots, \delta_N, G_{N1}, G_{N2}, G_{N3}, G_{N4}, \alpha_N)$.

Utilizando la misma configuración para el algoritmo SA que en la situación previa y permitiendo un número máximo de evaluaciones del fitness de 75000, los resultados obtenidos antes y después del proceso de optimización, resumidos en la Tabla 4, muestran una mejora en la cobertura final en torno al 99.2% cuando se considera la configuración de la red sugerida por el SA. Los parámetros optimizados se resumen en la Tabla 3, en la cual los retardos estáticos se referencian con respecto al transmisor 1. Detalles de las ganancias y orientaciones relativas a aplicar en las antenas sectoriales de cada transmisor, así como los mapas de cobertura obtenidos antes y después del proceso de optimización, se muestran en las Figs. 4 y 5, respectivamente.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una herramienta para analizar el comportamiento inicial de una red SFN y mejorar su rendimiento en términos de cobertura, mediante la optimización con el algoritmo SA de varios parámetros de transmisión de la red (retardos estáticos, ganancias omnidireccionales o sectoriales y/u orientaciones relativas en acimut de las antenas).

Los resultados expuestos demuestran que el proceso de optimización mediante el SA siempre mejora la cobertura inicial de una SFN, aunque el resultado final depende en gran medida del criterio de sincronización seleccionado para posicionar la ventana FFT en el receptor. En este caso, la estrategia MAX, ideal desde un punto de vista teórico, proporciona los mejores resultados en términos de cobertura, aunque la mejora con respecto a la situación inicial no es tan elevada como al considerar una estrategia como la U1, ampliamente utilizada por los fabricantes en receptores reales, debido a su relativa facilidad de implementación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (TEC2008-02730/TEC).

REFERENCIAS

- [1] *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television*, ETSI EN 300 744 V1.6.1 (2004-11).
- [2] R. Brugger and D. Hemingway, "OFDM receivers - impact on coverage of inter-symbol interference and FFT window positioning," *EBU Tech. Review*, pp. 1-12, 2003.
- [3] *Guide on SFN Frequency Planning and Network Implementation with regard to T-DAB and DVB-T*, BPN 066, Issue 1.0, July 2005.
- [4] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt and M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," *Science*, New Series, vol. 220, no. 4598, pp. 671-680, May 1983.
- [5] <http://srtm.csi.cgiar.org>

- [6] *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz*, ITU-R Recommendation P.1546-4, 2009.
- [7] J. R. Pérez, J. Basterrechea, J. Morgade, A. Arrinda and P. Angueira, "Optimization of the coverage area for DVB-T single frequency networks using a particle based method," *Proc. IEEE 69th Vehicular Technology Conference (VTC Spring 2009)*, pp. 1-5, Barcelona (Spain), April 2009.

N	P _{TX} (kW)	$\delta(\mu s)$	Ganancia sectores (dB)				$\alpha(^{\circ})$
			1	2	3	4	
1	5.00	0.00	-1.21	-2.20	-19.99	0.00	-31.70
2	2.00	16.4	-6.33	-20.00	0.00	-2.46	32.30
3	0.10	116.9	-2.42	-8.10	-0.62	-0.52	-4.24
4	2.00	107.2	-7.09	-18.49	0.00	-9.54	3.51
5	0.20	99.7	-6.04	-17.13	-3.22	-3.11	9.42
6	0.20	126.7	-0.87	-5.94	-0.02	0.00	-19.40
7	0.10	155.7	-6.33	-19.99	-0.22	-5.86	31.16
8	0.10	81.4	-0.09	-20.00	-0.23	-1.03	41.78
9	0.10	151.9	-3.17	-0.01	-1.18	-5.02	36.25
10	0.15	178.3	-3.51	-7.76	-19.80	-0.39	40.80
11	0.10	42.3	-0.12	-1.42	-2.90	-6.43	18.88
12	0.10	64.86	-0.07	-1.38	-2.40	-6.16	-22.94
13	0.10	77.1	-8.99	-2.18	-1.74	-2.37	42.39
14	0.10	77.0	-0.01	-8.56	-7.52	-1.50	-25.92
15	0.15	92.4	0.00	-2.07	-17.50	0.00	41.70
16	0.10	138.9	-1.45	-0.05	-0.17	-9.77	-21.72
17	0.10	146.5	-1.25	-0.01	-1.44	-7.11	-30.53
18	0.10	117.4	-1.30	-0.02	-11.73	-6.18	-27.19
19	0.10	129.0	-16.27	-0.57	-8.49	-2.90	-8.44
20	0.20	70.6	-0.39	-14.42	-3.54	-7.92	12.18
21	0.10	134.9	-10.16	-2.12	-0.19	-0.21	41.25
22	0.10	78.5	-7.69	-3.15	-0.27	-2.30	-33.60
23	0.10	195.2	-15.15	0.00	0.00	-1.06	44.99
24	0.20	67.2	-3.93	-9.93	-0.26	-6.44	-41.96
25	2.00	98.2	-0.01	0.00	-2.79	0.00	8.23

Tabla 3. Parámetros optimizados para la SFN de Cantabria (OPT2+U1).

Configuración	$C \geq C_{\min}$	$(C/I) \geq (C/I)_{\min}$	Ambos
Inicial	81.35	45.64	44.61
SA	91.01	93.87	88.89

Tabla 4. Resultados de cobertura obtenidos (OPT2+U1).

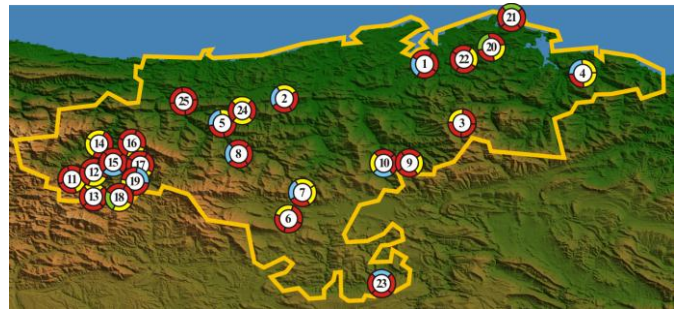


Fig. 4. Ganancias sectoriales y orientaciones relativas para la SFN optimizada de Cantabria (OPT2+U1). Las antenas sectoriales en azul, verde, amarillo y rojo representan las ganancias en los rangos $[-20, -15)$, $[-15, -10)$, $[-10, -5)$ y $[-5, 0]$ dB, respectivamente.

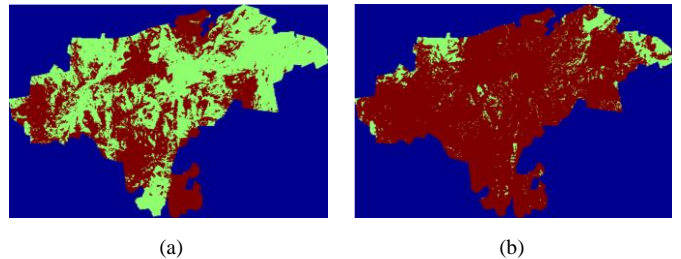


Fig. 5. Mapas de cobertura (OPT2+U1). (a) Inicial. (b) Optimizado. Los puntos receptores no considerados, cubiertos y no cubiertos se representan en azul, rojo y verde, respectivamente.